Análise de Heurísticas de TSP para Planejamento de Rota de VANTs em Cenários de Emergência

José C. de Albuquerque, Sidney C. de Lucena, Carlos A. V. Campos
Jefferson E. Simões, Pedro N. S. Moura
Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UNIRIO)
Av. Pasteur 458, Urca – Rio de Janeiro, RJ – Brasil
jose.albuquerque, sidney, beto, jefferson.simoes,
pedro.moura@uniriotec.br

ABSTRACT

Unmanned aerial vehicles (UAVs) have gained more prominence in the world due to their great versatility. Given cost reductions in their manufacturing and operation, especially when compared to conventional aircraft, UAVs have found great acceptance both in military and civilians applications. An important area in which UAVs can contribute is on the assistance to rescue teams in emergency scenarios. These scenarios require vehicles with large displacement capacity, so they can assist in communications and sensoring of the affected region, or even to supplies transportation. Using UAV as a mobile node of a network that tolerates delays and disconnections is a solution to assist the command and control center to communicate with the rescue teams scattered throughout the region. In order to optimize the displacement of the UAV between the ground nodes and consequently minimize communication latency, in this article we model the problem as a variant of the traveling salesman problem. In addition, we evaluated and compared four solution algorithms for the traveling salesman problem, to calculate an optimized route for an UAV to cycle between interest locations in certain emergency scenarios.

KEYWORDS. TSP, UAV, emergency scenarios, path planning.

RESUMO

Veículos aéreos não tripulados (VANTs) têm cada vez mais se destacado no cenário mundial devido a sua grande versatilidade. Dadas as reduções de custo de fabricação e operação, principalmente se comparado a aeronaves convencionais, os VANTs vêm encontrando grande aceitação tanto em aplicações militares quanto civis. Uma importante área de contribuição é no auxílio a equipes de apoio em cenários de emergência. Esses cenários necessitam de veículos com grande capacidade de deslocamento, de forma a auxiliar nas comunicações e no sensoreamento da região afetada, podendo inclusive transportar suprimentos. Nesse sentido, o uso de VANT como nó móvel de uma rede sem fio tolerante a atrasos e desconexões é uma solução para auxiliar o Centro de Comando e Controle na comunicação com as equipes de socorro espalhadas pela região. Com o intuito de otimizar o deslocamento do VANT entre os nós em terra e assim minimizar o atraso de comunicação, neste artigo modelamos o problema como uma variante do problema do caixeiro viajante. Foram avaliados e comparados quatro algoritmos de solução para o respectivo problema modelado, visando o cálculo de uma rota otimizada para um VANT ciclicamente percorrer os locais de interesse de determinados cenários de emergência.

PALAVRAS CHAVE. TSP, VANT, cenários de emergência, planejamento de rota.

https://proceedings.science/p/85445?lang=pt-br

1. Introdução

Devido a vantagens operacionais, tais como baixo custo de operação, segurança das equipes envolvidas e possibilidade de operação semi ou completamente autônoma, os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) vêm encontrando cada vez mais interesse por parte da sociedade civil, instituições militares e inclusive nas diversas áreas de pesquisa sobre veículos inteligentes (Sarris and ATLAS, 2001);(Wang et al., 2013);(Norouzi Ghazbi et al., 2016).

Um dos cenários de uso nos quais os VANTs podem ser amplamente empregados, com grande chance de sucesso, é na busca e resgate em situações de emergência e desastre, podendo atuar praticamente em todas as fases de um dado cenário de emergência. Ou seja, nas fases antes, durante e após o evento do desastre, auxiliando as equipes envolvidas ao realizar tarefas de transporte, mapeamento e sensoreamento, dentre outras (Gupta et al., 2016). E uma vez que os VANTs tendem a não encontrar obstáculos para transitar por regiões normalmente inóspitas ou de dificil acesso, em um cenário de desastre onde tenham ocorrido deslizamentos ou alagamentos, estes podem ser utilizados para, além de realizar o mapeamento das áreas de maior risco, funcionarem como nós móveis em uma rede de comunicação de emergência.

Devido à natureza caótica dos cenários de emergência, uma rede de comunicações que pretenda ser utilizada para auxiliar as comunicações nestes cenários precisa ter alta resiliência, capacidade de lidar com interferências, desconexões, grandes atrasos e com mudanças de topologia da rede, o que pode ocorrer de forma altamente dinâmica. As redes tolerantes a atrasos e desconexões (*DTN - Delay Tolerant Network*), como o próprio nome sugere, conseguem lidar com essas dificuldades (Warthman, 2003). No entanto, devido às características de funcionamento dos protocolos para redes DTN, não é possivel assegurar que as informações serão sempre entregues, pois algumas partes da rede podem estar desconectadas.

Contudo, geralmente os cenários de emergência são caracterizados por apresentarem pontos específicos, pré-definidos, onde as equipes de socorro e resgate irão atuar em busca de eventuais vítimas, ou na tentativa de contenção e mitigação do desastre. Esses pontos são denominados como pontos de interesse (*PoI - Point of Interest*). Desta forma, podemos prever estatísticamente e com um alto grau de assertividade por onde um VANT deve sobrevoar para que as mensagens de uma rede DTN, constituída por VANTs e pelas diversas equipes atuando no local, sejam entregues com a maior taxa de sucesso e com o menor atraso possível.

Basicamente, temos um problema clássico do Caixeiro Viajante (TSP - *Travelling Salesman Problem*), no qual um indivíduo (VANT) precisa percorrer todas as cidades na sua rota (PoIs) partindo de sua cidade natal e passando pelo Centro de Comando e Controle que coordena toda a operação na área afetada, com uma função custo reduzida.

Neste trabalho, modelamos o problema para cenários de emergência e comparamos a performance de algoritmos conhecidos para a solução do TSP, de forma a se obter uma rota otimizada na qual um VANT percorra os PoIs de um determinado cenário de emergência no menor tempo possível. Com esse objetivo, foram então analisadas e comparadas as implementações das heurísticas vizinho mais próximo, colônia de formigas, algoritmo genético e Christophides.

https://proceedings.science/p/85445?lang=pt-br

O restante do presente artigo está organizado da seguinte maneira. Na Seção 2 descrevemos os trabalhos relacionados ao problema investigado. Na Seção 3 apresentamos o problema e o cenário estudado. A modelagem proposta é apresentada na Seção 4. Nas Seções 5 e 6 são descritas as heurísticas e o ambiente computacional utilizado, respectivamente. Na Seção 7 são apresentados os resultados obtidos para as heurísticas estudadas em relação ao tamanho da trajetória e o tempo do percurso. Finalmente, a Seção 8 traz as conclusões e os trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

O trabalho em (Yanmaz et al., 2018) apresenta um sistema colaborativo de mini VANTs para emprego em diversas áreas como controle de tráfego, monitoramento aéreo e assistência em desastres. Embora o artigo apresente um *framework* para a criação de tal sistema, um dos problemas em aberto que é evidenciado é a necessidade de um algoritmo de tomada de decisão sobre qual a melhor rota a ser seguida pelos VANTs.

Em (Savuran and Karakaya, 2015) um método otimizado para o cálculo da trajetória de um VANT lançado a partir de um navio é apresentado. Os autores implementam e analisam um método otimizado para o algoritmo genético e o comparam com o algoritmo do vizinho mais próximo. A comparação com outros métodos de solução poderia ser explorada para possivelmente evidenciar a performance da otimização proposta.

No trabalho (Pinto et al., 2016) é proposto um planejamento de rota pelo próprio VANT, aumentando sua autonomia. Neste trabalho, o objetivo dos autores foi realizar o replanejamento de uma rota previamente definida entre apenas dois pontos, desviando de obstáculos quando necessário, utilizando os métodos de transformada de distância, árvores aleatórias de rápida exploração e o caminho probabilístico.

Em (Zhengxiang et al., 2015), o planejamento de rota leva em consideração eventuais riscos ao VANT durante o desenrolar da missão. Neste trabalho um aprimoramento do algoritmo de colônia de formigas é apresentado ao ser utilizado em conjunto com o algoritmo genético. Desta forma, a trilha inicial de feromônios utilizada pelo algoritmo de colônia de formigas é gerada a partir de mutações e aprimoramentos de uma população inicial criada pelo algoritmo genético. O foco principal do trabalho é o planejamento de uma rota para o VANT com um único ponto de destino, evitando obstáculos, sem considerar outros pontos de destino no trajeto.

Em (Uriti and Kumar, 2017) é também apresentado um algoritmo de colônia de formigas otimizado no qual se propõe uma solução híbrida, que utiliza os conceitos de colônia de formigas e organização de enxame de partículas. Contudo, seu foco foi no planejamento de missões de enxames de VANTs e no vôo em formação desse enxame.

Em (Sharef et al., 2013) é apresentado um estudo comparativo de alguns protocolos de roteamento para redes veiculares baseados no posicionamento dos nós da rede. Os autores deixam claro que ainda existem problemas a serem resolvidos, principalmente no tocante às baixas taxas de entrega de dados e aos grandes atrasados sofridos pela rede.

3. Caracterização do Cenário

Por definição, um cenário de emergência é uma região ou área onde tenha ocorrido um acidente natural ou causado pelo homem, que coloca em perigo seres vivos, propriedades ou o meio ambiente, e na qual sua ocorrência devasta toda a infraestrutura local. Os

https://proceedings.science/p/85445?lang=pt-br

cenários de emergência são caracterizados por apresentarem regiões ou áreas onde se exige uma atenção maior, pois presume-se que existam vítimas necessitando de socorro imediato. Esses pontos são chamados de Ponto de Interesse (*PoI - Point of Interest*). Recursos, como equipes de resgate e suprimentos, são enviados para essas localidades coordenadas por um ponto central denominado por Centro de Comando e Controle (*CC - Control Center*).

Dependendo do tipo da região onde o desastre ocorreu, a mobilidade das equipes pode ficar extremamente debilitada, podendo inclusive necessitar de veículos especiais como barcos e aeronaves para se deslocarem até determinados PoIs. O uso de helicópteros e aviões não é raro nessas ocasiões, porém existe uma logística bastante complexa e custosa para colocar essas aeronaves no ar, envolvendo, por exemplo, questões de tripulação e abastecimento, dentre outras. Além desses fatores, muitas vezes essas aeronaves estão ocupadas demais em missões de resgate para poderem ser empregadas em missões de busca de informações. Mesmo com a ajuda desses veículos, as equipes e até sobreviventes podem estar ilhados, sem ter como se deslocarem, de forma extremamente súbita devido a mudanças que podem ocorrer na natureza do cenário.

Desta forma, é importante que as equipes estejam em contato constante com o CC. Ocorre que, muitas vezes em áreas com estado de emergência, a infraestrutura local de comuniçações pode está comprometida por ter sido total ou parcialmente destruída, ou ainda que esteja operacional, pode se encontrar congestionada impossibilitando seu uso pelas equipes de busca e salvamento. Sendo assim, é conveniente que as equipes possam contar com um sistema emergencial de comunicações que lhes permita a constante troca de informações, de maneira confiável e independente da infraestrutura da região, além de apresentar baixa latência para a transmissão das mensagens (Hayat et al., 2016).

As Redes Móveis *Ad hoc* podem ser uma solução de conectividade nesses cenários fornecendo diversos serviços, tais como voz por IP e vídeo sob demanda, dentre outros. VANTs podem ser utilizados para levar conectividde às equipes que se encontrem em regiões de difícil acesso, atuando como nós de grande mobilidade da rede de comunicação de auxílio às equipes (Manyam et al., 2017). No entanto, devido a fatores adversos como, por exemplo, interferências eletromagnéticas, distância elevada entre equipes que se encontram em PoIs mais distantes, barreiras naturais como morros ou vales, além da própria mobilidade das equipes que, por vezes, precisam retornar ao Centro de Comando e Controle para reabastecimento, uma rede puramente *ad hoc* pode não ser a melhor solução. Isto porque poderão ocorrer interrupções na conectividade da rede, inviabilizando a comunicação entre os dispositivos.

Dentro desse contexto, as redes oportunísticas ou tolerantes a atrasos e desconexões (DTN) podem ser melhor empregadas em cenários como esses, provendo algum tipo de conectividade, mesmo quando não houver um caminho fim-a-fim para o tráfego de dados. VANTs sobrevoando os PoIs, nos quais as equipes estão trabalhando, podem ser usados para receber e enviar dados para essas equipes, posteriormente transportá-los até um outro PoI e, assim sucessivamente, até que tenha percorrido todo o cenário, incluindo o CC para receber e entregar informações (de Albuquerque et al., 2014, 2016).

As DTNs utilizam uma abordagem denominada armazena-transporta-e-encaminha para as mensagens, o que permite contornar o problema da falta de conectividade fim-a-fim (Sivakumar and Tan, 2009, 2010; de Freitas et al., 2010). A premissa de funcionamento dessa abordagem é a de que um nó que receba uma mensagem endereçada a outro nó

https://proceedings.science/p/85445?lang=pt-br

manterá esta mensagem armazenada em caso de desconexão da rede, transportando-a para outro nó após reconectado, seja ele destinatário da mensagem ou não. Assim, o nó de destino, mesmo tendo estado desconectado da rede, poderá receber a mensagem tão logo consiga estabelecer uma conexão com um nó que esteja transportando a mensagem. Desta forma, as redes oportunísticas, por não necessitarem de uma infraestrutura prévia de comunicação para seu funcionamento e por serem capazes de operarem em cenários nos quais as desconexões dos nós ocorrem de forma frequente, apresentam-se como candidatas a uma solução de comunicação que consiga ser rapidamente instalada em cenários de desastres naturais.

Embora as redes DTN, dependendo do tipo de cenário no qual estejam sendo utilizadas, possam apresentar grandes atrasos e até mesmo perda de dados, em um ambiente desafiador como o de uma situação de emergência o roteamento oportunístico utilizado pelas redes DTN talvez seja a única maneira de estabelecer uma comunicação entre as equipes envolvidas (Uchida et al., 2013). Assim, esta abordagem de rede de comunicação de dados será utilizada na modelagem do problema e será descrita na próxima seção do presente artigo.

4. Modelagem do Cenário

Para fins deste estudo, considera-se que o VANT sempre inicia seu voo partindo do Centro de Comando e Controle (CC) e deve ter sua trajetória planejada de tal forma que passe por todos os PoIs conhecidos e, por fim, retorne ao CC para um novo ciclo. Os PoIs e o próprio CC serão tratados como pontos no plano.

A partir desses pontos, constroi-se um grafo G(V,E) no qual cada um desses pontos correspondem a um vértice V. Para cada par de vértice existe uma aresta E para a qual o custo é a distância estimada entre esses dois pontos. Portanto, o tempo de deslocamento entre dois pontos quaisquer do grafo dependerá basicamente da velocidade de deslocamento do VANT. A Figura 1 exemplifica o grafo assim construído.

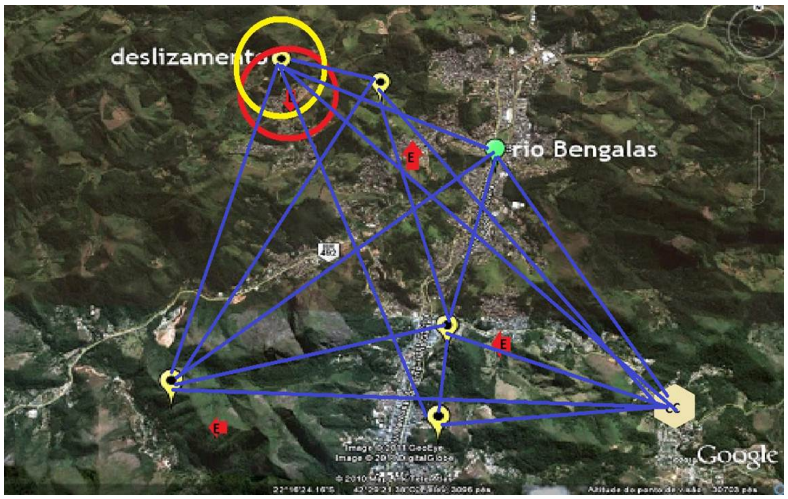


Figura 1. Grafo construido sobre cenário

O grafo formado pelos pontos mostrados na Figura 1 obedece a premissa da desigualdade triangular, na qual o custo da distância de A a B, somado ao custo da distância de B a C, é maior ou igual ao custo da distância de A a C, conforme a Equação 1.

$$C_{a,b} + C_{b,c} \geq C_{a,c} \forall a, b, c \in N \quad (1)$$

Uma vez que o VANT possa atingir qualquer um dos pontos a partir de qualquer outro ponto, qualquer caminho no grafo G é uma rota possível para o VANT. Portanto, todo ciclo no grafo G que visite todos os vértices é uma possível solução para o problema. A Figura 2 exemplifica um ciclo de vôo do VANT, o qual se desloca do ponto A ao ponto C e, por fim, fecha o ciclo retornando ao CC.

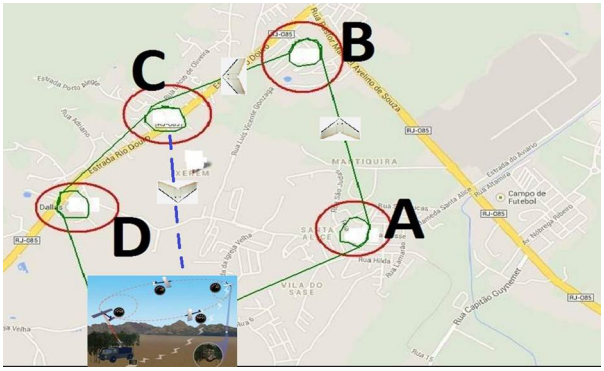


Figura 2. Ciclo completo

Uma solução com custo mínimo, ou seja, menor espaço físico total a ser percorrido pelo VANT, redundando em um tempo otimizado de deslocamento pelo cenário, obrigatoriamente é um ciclo Hamiltoniano. Portanto, o problema se resume a encontrar um ciclo com custo mínimo, o que equivale a encontrar um ciclo Hamiltoniano com custo mínimo, que é exatamente o problema do TSP.

Embora o objetivo do deslocamento do VANT através da rota planejada seja o de estabelecer uma rede de comunicações entre os vértices do grafo G, os quais podem ser considerados nós dessa rede de comunicação, para a modelagem deste trabalho desconsideraremos o alcance de comunicações para fins de localização espacial de cada ponto. Para efeitos de comunicação, consideraremos que o VANT é equipado com rádios que permitem sua comunicação com os PoIs, as equipes e o próprio CC, até uma distância máxima d.

5. Heurísticas para TSP

Como explicado na Seção 1, o TSP pode ser perfeitamente aplicado ao contexto de encontrar rotas de menor custo em cenários de emergência. Assim, dentre várias heurísticas existentes para TSP, as heurísticas vizinho mais próximo, colônia de formigas, algoritmo genético e Christophides foram as selecionadas para serem utilizadas neste trabalho.

A heurística do vizinho mais próximo baseia-se em uma classe de algoritmos que utiliza um método denominado guloso (*greedy*) e é uma das abordagens mais simples, em que a premissa básica é a de sempre visitar a cidade mais próxima adjacente ao ponto em que se está, marcando as cidades que já foram visitadas. Após visitar todas as cidades, tem-se uma trajetória definida que passa por todas as cidades apenas uma vez (Hurkens and Woeginger, 2004).

O algoritmo conhecido como Christofides, criado pelo professor Nicos Cristophides, garante uma solução que pode ser, no pior caso, 1,5 vezes maior que a solução ótima.

https://proceedings.science/p/85445?lang=pt-br

Neste método, cria-se uma árvore geradora mínima com todas as cidades e cria-se, então, um conjunto de vértices com grau ímpar. Assim, esses dois grafos são combinados criando em seguida um ciclo Euleriano. Por fim, removem-se os vértices repetidos, criando assim um ciclo Hamiltoniano (Nilsson, 2003).

Os algoritmos genéticos são uma classe de algoritmos que atuam de forma similar à natureza, criando um processo de evolução a partir de uma população de soluções possíveis gerada de forma aleatória. Cada solução candidata tem um peso indicativo de quão boa é a solução. Todos ou apenas alguns desses candidatos podem gerar descendentes ou mutações. Através da seleção dos candidatos mais aptos para gerar descendentes ou mutações, a qualidade das soluções aumenta (Liu and Zeng, 2009).

Baseando-se em uma trilha virtual de feromônios, a heurística de colônia de formigas tenta imitar o processo pelo qual as formigas procuram alimentos. As formigas deixam um rastro de feromônios ao explorar novos locais. Essa trilha guia outras formigas por caminhos onde provavelmente existe comida. Assim, quanto mais formigas trilharem determinado caminho, maior será a probabilidade de existir comida no caminho, que será então o escolhido (Dorigo et al., 1996) e (Perez-Carabaza et al., 2018).

No presente artigo foram utilizadas as implementações dos algoritmos de colônia de formigas e genético conforme apresentadas em (Dorigo et al., 1996) e (Haque et al., 2013), respectivamente. O algoritmo de Christofides foi implementado utilizando o código disponibilizado por **Faisal Ejaz** no repositório Github, e utiliza os métodos em Java, necessários para o funcionamento do algoritmo, disponibilizado por **Bjorn Harald Olsen** e **Oscar Täckström** (Harald, 2018).

6. Ambiente Computacional

Para avaliar os algoritmos descritos na seção anterior em relação a cenários de emergências, dois conjuntos de instâncias foram utilizados. O primeiro conjunto foi utilizado como referência, para que fosse feita a validação da correta implementação dos algoritmos na IDE. O outro conjunto de instâncias objetiva a análise comparativa das soluções, sendo representativo de regiões que estiveram em situação de emergência, extraídos de artigos que tratam de cenários de emergência, ainda que o objeto de estudo desses artigos não fosse o mesmo do presente trabalho (Mete and Zabinsky, 2010; Sheu, 2007; Hasnain et al., 2016).

As instâncias de referência foram extraídas da biblioteca *online* **tsplib**. Trata-se de um repositório em que são disponibilizadas diversas instâncias para o TSP, com suas respectivas soluções ótimas conhecidas (Reinelt, 1991). As instâncias de referência utilizadas foram **att48, fri26** e **gr17**. A Tabela 1 apresenta as características dessas instâncias.

Instâncias de Referência - TSPLIB	
Nome	#cidades
att48	48
fri26	26
gr17	17

Tabela 1. Instâncias de Referência

As instâncias extraidas de cenários de emergência, utilizadas para análise dos algo-

ritmos implementados, foram criadas a partir dos mapas da Figura 3. A Tabela 2 apresenta as características de cada uma dessas instâncias.

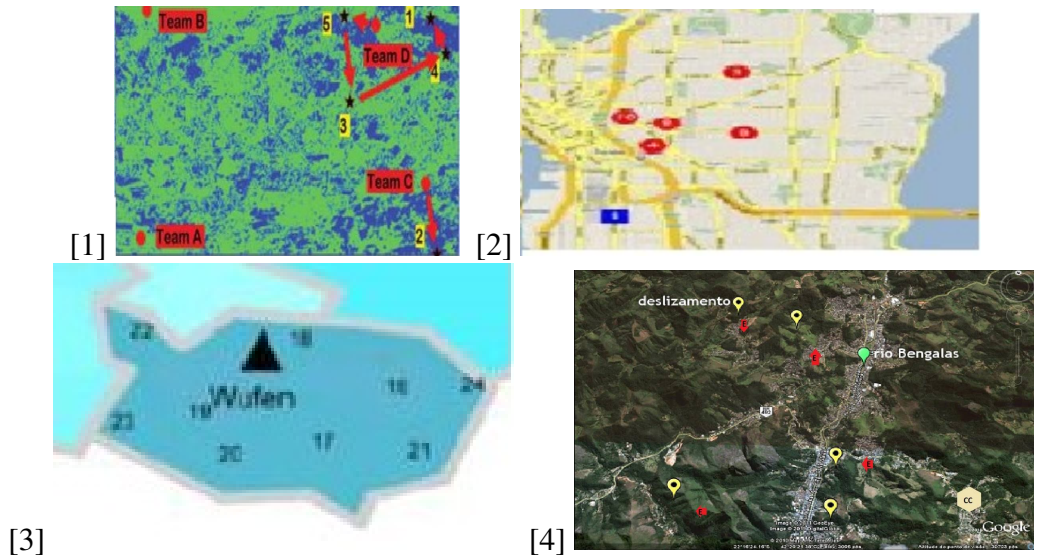


Figura 3. Mapas de cenários de emergência.

Instâncias de cenários de emergência (fig. 3)	
#ID	#cidades
1	9
2	6
3	10
4	11

Tabela 2. Instâncias de cenários de emergência

Os algoritmos avaliados foram implementados utilizando a IDE Eclipse, Java 9.0.1 rodando em um computador com 4GB de RAM, processador i5 da Intel de 2.5GHz e sistema operacional Windows 7 de 64 bits. Foram realizadas 10 rodadas com cada uma das instâncias utilizadas, em cada um dos algoritmos implementados, e calculada a média aritmética.

Para o algoritmo genético, foi adotado um tamanho populacional e de mutações de 100 gerações para cada parâmetro. No algoritmo de colônia de formigas, foi utilizada uma taxa de degradação de feromônio de 50%, uma taxa de 1% de escolha aleatória da próxima cidade, a cada rodada, e 2000 iterações.

7. Resultados Obtidos

Após a modelagem do problema e a descrição do ambiente computacional para avaliação das heristicas TSP para cenários de emergência, nesta seção são apresentados os resultados obtidos pelos algoritmos investigados para as instâncias descritas na seção anterior.

As Tabelas 3 e 4 mostram o custo da trajetória calculada em metros e em minutos, assumindo o VANT a uma velocidade média de deslocamento equivalente a 30 km/h.

Conforme podemos observar, a heurística baseada em colônia de formigas obtém soluções de menor custo em todas as instâncias analisadas, seguida de perto pelo algoritmo de Christofides. De fato, o algoritmo de Christofides apresenta a maior diferença comparativa somente para a instância 3, sem no entanto distanciar-se de sua premissa de oferecer uma solução, no pior dos casos, dentro de uma relação de 3/2 da melhor solução. Ou seja, uma solução cujo custo será, no máximo, uma vez e meia pior do que o custo da melhor solução possível para aquela instância.

Custo da trajetória calculada em metros				
Instâncias	1	2	3	4
Ant colony	1.910	5.035	37.420	21.191
Christofides	1.970	5.215	50.680	21.191
Genetic	2.440	5.215	63.960	33.831
Nearest	2.100	5.880	45.160	21.841

Tabela 3. Trajetória total em metros

Custo da trajetória em minutos VANT a 30km/h				
Instâncias	1	2	3	4
Ant colony	3,82	10,07	74,84	42,38
Christofides	3,94	10,43	101,36	42,38
Genetic	4,88	10,43	127,92	67,66
Nearest	4,20	11,76	90,32	43,68

Tabela 4. Tempo para completar a trajetória em minutos

Podemos observar ainda que o algoritmo genético apresenta os piores resultados para todas as instâncias e que o algoritmo do vizinho mais próximo, por vezes, aproxima-se dos melhores resultados apresentados pelos algoritmos de colônia de formigas e Christofides.

A Tabela 5 mostra o tempo que cada algoritmo levou para calcular a solução apresentada para cada uma das instâncias. Neste caso, os algoritmos de Christofides e do vizinho mais próximo apresentam os menores tempos para o cálculo da solução, enquanto os algoritmos de colônia de formigas e genético necessitam de tempo exponencialmente superior para calcularem a solução para essas mesmas instâncias. De forma geral, podemos concluir que o algoritmo de Christofides apresenta a melhor relação custo/benefício, pois apresenta uma solução bastante próxima da melhor solução obtida pelos quatro algoritmos a um custo de tempo de processamento consideravelmente baixo. Para as instâncias analisadas, temos um aumento no tempo total de deslocamento através da rota calculada pelo algoritmo de Christofides, no pior caso, na instância 3, sendo este cerca de 35% superior, mas com uma redução do tempo de cálculo de mais de 100 vezes se comparado com o algoritmo de colônia de formigas, o qual apresenta as rotas de menor custo geral.

Por fim, para efeitos de avaliação, o parâmetro do número de iterações do algoritmo de colônia de formigas foi alterado com o objetivo de se verificar qual o número mínimo de iterações que permitiria uma melhor performance do algoritmo quanto ao tempo para

Tempo para cálculo da trajetória em milisegundos				
Instâncias	1	2	3	4
Ant colony	158.664	85.562	180.847	251.808
Christofides	1.727	1.637	1.764	1.877
Genetic	258.458	235.334	235.919	231.906
Nearest	1.753	1.163	1.562	1.704

Tabela 5. Tempo para calcular a trajetória em milisegundos

encontrar uma solução, sem que a qualidade dessa solução fosse degradada. Para as instâncias analisadas o valor encontrado foi de 10% do valor utilizado para todos os testes, ou seja, 20 iterações. Com esse baixo número de iterações, o algoritmo teve, conforme esperado, uma diminuição linear no tempo de cálculo das soluções, caindo portanto para cerca de 10% dos valores apresentados. Vale ressaltar que, embora uma considerável melhora nos tempos de execução do algoritmo tenha sido observada, não se pode afirmar que a qualidade da solução se manterá para outras instâncias. Além disso, os algoritmos do vizinho mais próximo e Christofides ainda apresentam tempos de execução para encontrar uma solução muitas vezes inferior.

8. Conclusão

Neste trabalho, foram analisados quatro algoritmos para a solução do problema do caixeiro viajante, com o objetivo de empregar tais algoritmos no planejamento da rota que minimiza o tempo total de voo de um VANT em cenários de emergência, nos quais existem diversos pontos de interesse e equipes de resgate em posições fixas e conhecidas. Para tal, foram extraídas instâncias para serem aplicadas aos algoritmos implementados, a partir de mapas de cenários de emergência que foram objeto de outros estudos na literatura.

A partir dos resultados obtidos, podemos considerar que, comparativamente, os algoritmos do vizinho mais próximo e de Cristophides são operacionalmente equivalentes, sendo que ambos apresentaram um tempo computacional para o cálculo da trajetória bastante próximos entre si. Além disso, a solução encontrada não se apresenta muito distante da melhor trajetória, que, para as instâncias estudadas, foram calculadas pelo algoritmo de colônia de formigas.

Embora na literatura os algoritmos de colônia de formigas e genético sejam largamente apresentados e defendidos, nos casos analisados neste trabalho podemos dizer que estes foram os menos eficientes, principalmente no tocante ao tempo total para o cálculo da solução.

Como trabalhos futuros, pretende-se expandir a modelagem do problema para o uso de mais de um VANT, assim como considerar que determinados nós em terra possam estar se deslocando.

Referências

de Albuquerque, J. C., de Lucena, S. C., and Campos, C. A. V. (2014). Investigação sobre o uso de vants em redes dtn para cenários de emergência. *XIX Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços– WGRS*.

https://proceedings.science/p/85445?lang=pt-br

de Albuquerque, J. C., de Lucena, S. C., and Campos, C. A. V. (2016). Evaluating data communications in natural disaster scenarios using opportunistic networks with unmanned aerial vehicles. In *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2016 IEEE 19th International Conference on*, pages 1452–1457. IEEE.

de Freitas, E. P., Heimfarth, T., Netto, I. F., Lino, C. E., Pereira, C. E., Ferreira, A. M., Wagner, F. R., and Larsson, T. (2010). Uav relay network to support wsn connectivity. In *Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2010 International Congress on*, pages 309–314. IEEE.

Dorigo, M., Maniezzo, V., and Colorni, A. (1996). Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 26(1):29–41.

Gupta, L., Jain, R., and Vaszkun, G. (2016). Survey of important issues in uav communication networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(2):1123–1152.

Haque, A., Shah, J., Ejaz, F., and Xu, J. X. (2013). An empirical evaluation of approximation algorithms for the metric traveling salesman problem. *Department of Computer Science at the University of Texas at Austin*.

Harald (2018). Implementação do algoritmo de christofides. `https://github.com/faisal22/Christofides`. Acessado em: 17 janeiro. 2018.

Hasnain, Z., Hubbard, J. E., and Cunnigham, M. A. (2016). A proposed architecture for coordinating first response through small unmanned aerial systems. In *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2016 International Conference on*, pages 1066–1074. IEEE.

Hayat, S., Yanmaz, E., and Muzaffar, R. (2016). Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(4):2624–2661.

Hurkens, C. A. and Woeginger, G. J. (2004). On the nearest neighbor rule for the traveling salesman problem. *Operations Research Letters*, 32(1):1–4.

Liu, F. and Zeng, G. (2009). Study of genetic algorithm with reinforcement learning to solve the tsp. *Expert Systems with Applications*, 36(3):6995–7001.

Manyam, S. G., Rasmussen, S., Casbeer, D. W., Kalyanam, K., and Manickam, S. (2017). Multi-uav routing for persistent intelligence surveillance & reconnaissance missions. In *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2017 International Conference on*, pages 573–580. IEEE.

Mete, H. O. and Zabinsky, Z. B. (2010). Stochastic optimization of medical supply location and distribution in disaster management. *International Journal of Production Economics*, 126(1):76–84.

Nilsson, C. (2003). Heuristics for the traveling salesman problem. *Linkoping University*, pages 1–6.

Norouzi Ghazbi, S., Aghli, Y., Alimohammadi, M., and Akbari, A. (2016). Quadrotors unmanned aerial vehicles: A review. *International Journal on Smart Sensing & Intelligent Systems*, 9(1).

Perez-Carabaza, S., Besada-Portas, E., Lopez-Orozco, J. A., and Jesus, M. (2018). Ant colony optimization for multi-uav minimum time search in uncertain domains. *Applied Soft Computing*, 62:789–806.

Pinto, M. J., de Oliveira, R. A. S., and de Medeiros, F. L. L. (2016). Análise de cenários para replanejamento de rotas para vants. *XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*.

Reinelt, G. (1991). Tsplib—a traveling salesman problem library. *ORSA journal on com-*

https://proceedings.science/p/85445?lang=pt-br

puting, 3(4):376–384.

Sarris, Z. and ATLAS, S. (2001). Survey of uav applications in civil markets (june 2001). In *The 9 th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation (MED'01)*.

Savuran, H. and Karakaya, M. (2015). Route optimization method for unmanned air vehicle launched from a carrier. *Lecture Notes on Software Engineering*, 3(4):279.

Sharef, B. T., Alsaqour, R. A., and Ismail, M. (2013). Comparative study of variant position-based vanet routing protocols. *Procedia Technology*, 11:532–539.

Sheu, J.-B. (2007). An emergency logistics distribution approach for quick response to urgent relief demand in disasters. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(6):687–709.

Sivakumar, A. and Tan, C. (2009). Formation control for lightweight uavs under realistic communications and wind conditions. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Chicago: AIAA*.

Sivakumar, A. and Tan, C. K.-Y. (2010). Uav swarm coordination using cooperative control for establishing a wireless communications backbone. In *Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems: volume 3-Volume 3*, pages 1157–1164. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.

Uchida, N., Kawamura, N., Williams, N., Takahata, K., and Shibata, Y. (2013). Proposal of delay tolerant network with cognitive wireless network for disaster information network system. In *Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA), 2013 27th International Conference on*, pages 249–254. IEEE.

Uriti, M. S. and Kumar, S. A. S. (2017). Partially optimistic uav route planning & formation planning using ant colony optimization algorithm. *International Research Journal of Engineering and Technology - IRJET*.

Wang, L.-l., Zhou, W.-p., and Zhao, S.-l. (2013). Application of mini-uav in emergency rescue of major accidents of hazardous chemicals. In *2013 the International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE 2013)*. Atlantis Press.

Warthman, F. (2003). Delay tolerant networks (dtns): A tutorial, dtn research group. Technical report, Internet Draft.

Yanmaz, E., Yahyanejad, S., Rinner, B., Hellwagner, H., and Bettstetter, C. (2018). Drone networks: Communications, coordination, and sensing. *Ad Hoc Networks*, 68:1–15.

Zhengxiang, Q., Guocheng, W., and Jingen, W. (2015). Uav route planning based on dual populations genetic ant colony algorithm. *5th International Conference on Information Engineering for Mechanics and Materials - ICMM*.

https://proceedings.science/p/85445?lang=pt-br